2004年度卒業研究

デジタルビデオカメラを用いた
月や小惑星による恒星の掩蔽観測

大阪教育大学　自然研究専攻　自然システムコース
学籍番号 016763　宇宙科学研究室

田中謙一

指導教官　定金晃三教授

2005年1月31日

目次 ・・・・・2

1.はじめに

近年は観測機器の目覚ましい進歩により、はるか 100 億光年のかなたというほぼ宇宙誕生時に存在していた天体までも観測できるようになった。その間に様々な観測が提案され実践されていった。今回私が観測したのは、ビデオ撮影による掩蔽（えんぺい、英名 occultation）観測というものである。掩蔽とは広辞苑第五版によると「おおいかくすこと、さえぎりおおうこと」という意味であり、いわゆる星が星を隠す現象のことである。この観測方法はかなり古くからされており、1970 年代くらいまで盛んに行われていた。21 世紀になった現代でも掩蔽観測はその目的や装置を変えて続けられており、特にビデオカメラによる観測はアマチュアの天文家でも精度の高いデータが得られる観測方法として注目されている。

また、観測するにあたって柏原キャンパスの 51cm 反射望遠鏡ではなく、天王寺キャンパスの 20cm 屈折望遠鏡を用いてビデオ観測を行うことにした。これは天王寺キャンパスの望遠鏡はレンズの口径が小さいので視野が比較的広く星を見つけやすいことや、AV 機器等マルチメディア関係との連携が容易であることが挙げられるのだが、それ以外にこの望遠鏡は2003年に教員養成課程の天文学研究室が卒業研究に使用して以来使われていなかったので使わなければせっかくの施設が無駄になってしまうという気持ちもあるからである。この研究を機会により積極的にこの望遠鏡を使用することを望んでいる。

2.掩蔽(occultation)とは

2-1.掩蔽の歴史

掩蔽とはある天体が他の天体に隠される現象の事を指す。似たような現象に「食(eclipse)」があり、これは天体が他の天体の影に入って暗くなる現象のことを指す。日食は太陽が月に隠されるので「掩蔽」であり、月食は月が地球の影に入って暗くなるので「食」に分類される。しかし、掩蔽という言葉があまり浸透していないため両者を含めて「食」と呼ぶことが多い。[1]これらは天球上における天体の動きの違いと地球上における観測者の位置関係によって観測できる現象である。掩蔽観測による天文学的研究の歴史は長く、位置天文学として古くは第二次世界大戦よりも前から行われていた。以下に過去に行われた掩蔽観測を示す。

1917　土星のリングによる恒星の掩蔽観測でリング通過時の恒星の光度変化を研究[2]

1962　月によるクエーサー3C273 の掩蔽観測から 3C273 の位置を決定[3]

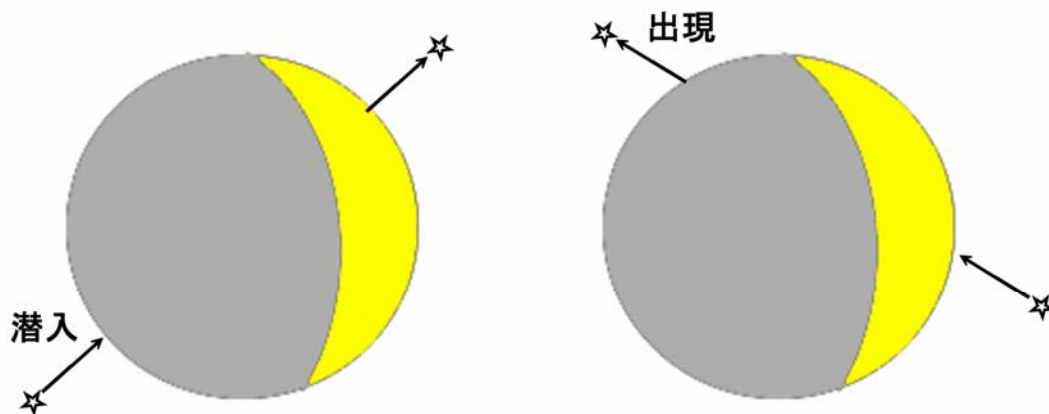
1960s 月によるかに星雲の掩蔽観測から電波源が点源で無いことを発見[3]

1977　天王星による恒星の掩蔽観測から天王星のリングを発見[3]

1982　月によるレグルスの掩蔽観測からレグルスの視直径を決定[4]

今回私が観測を行った掩蔽現象は 2 種類ある。

2-2.月による恒星の掩蔽

この現象は月が恒星を隠す現象であり、一般的に星食と呼ばれている。月に恒星が隠れる掩蔽を潜入と呼び、月から恒星が現れる掩蔽を出現と呼ぶ。月の明るい部分(明部)での掩蔽は恒星がいつ潜入・出現したかどうか決定するのが困難であるため、月の暗い部分(暗部)での掩蔽観測が基本となる。[5]

かつては星食の観測は天体の大きさや天体までの距離決定、月の運動や地球の自転速度のふらつきを調べそこから暦表時を決定することなどを目的として観測されていた。[6][7]現在はこれに代わる様々な技術によってより精密に求めることができるようになった。現在の星食観測の意義は大きく二つある。

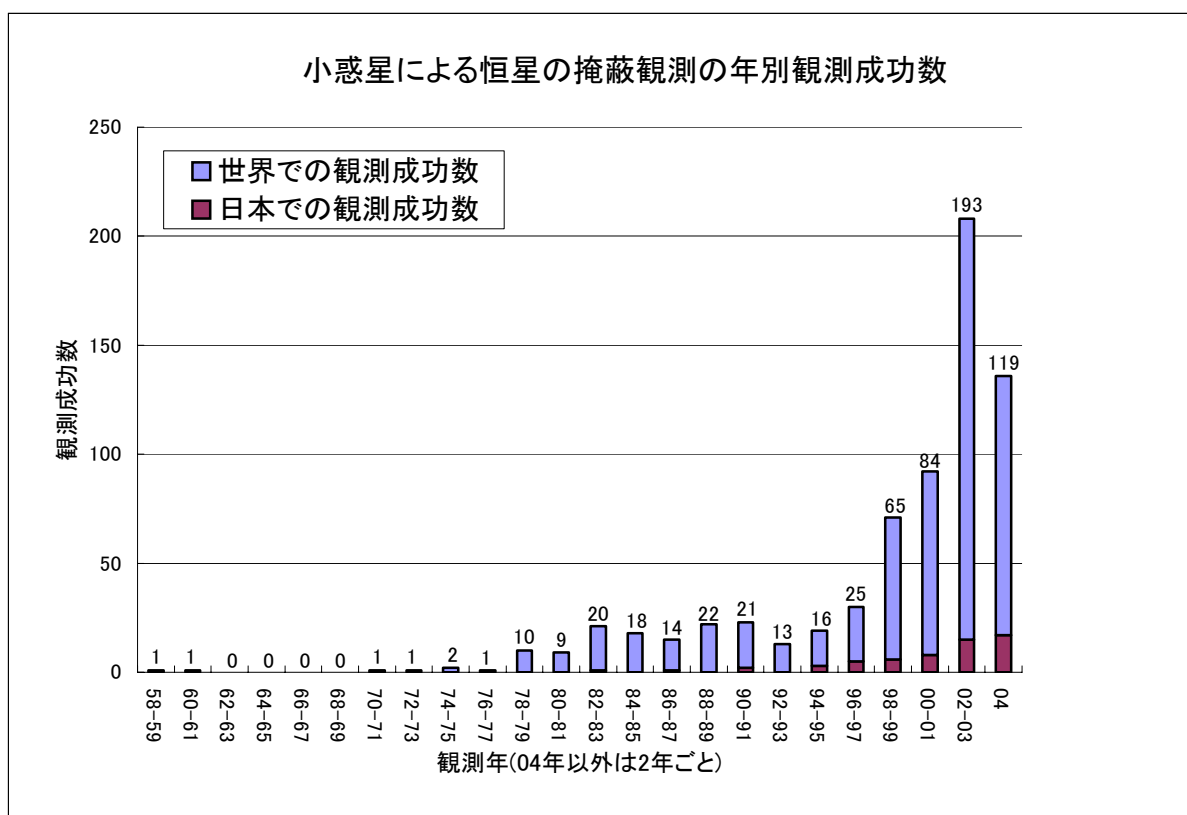
①精密な月縁データの取得[(6)(7)]

星食を観測することで月の一地点の地形を決定することができる。月縁の補正には現在でも 1963 年に発表されたワッツの月縁図が使用されている。この月縁データは様々な誤差があることが知られているが、1994 年に行われたアメリカのクレメンタイン月探査機でも精密な月縁データを求めることはできなかった。現在のところワッツの月縁図に代わりうる観測はない。ビデオ撮影による観測は 30 分の 1 秒の精度で星食の時刻を決定できる。これは月縁のデータが 0.015″ 以内、月面の実距離で 30m 以内の精度を意味しており、クレメンタインの精度 50m を上回ることになる。この観測によりワッツの月縁図を修正するためのデータを得ることが可能になる。また、詳細な月縁データは日食の観測から太陽の大きさの変化を検出するためにも必要になる。

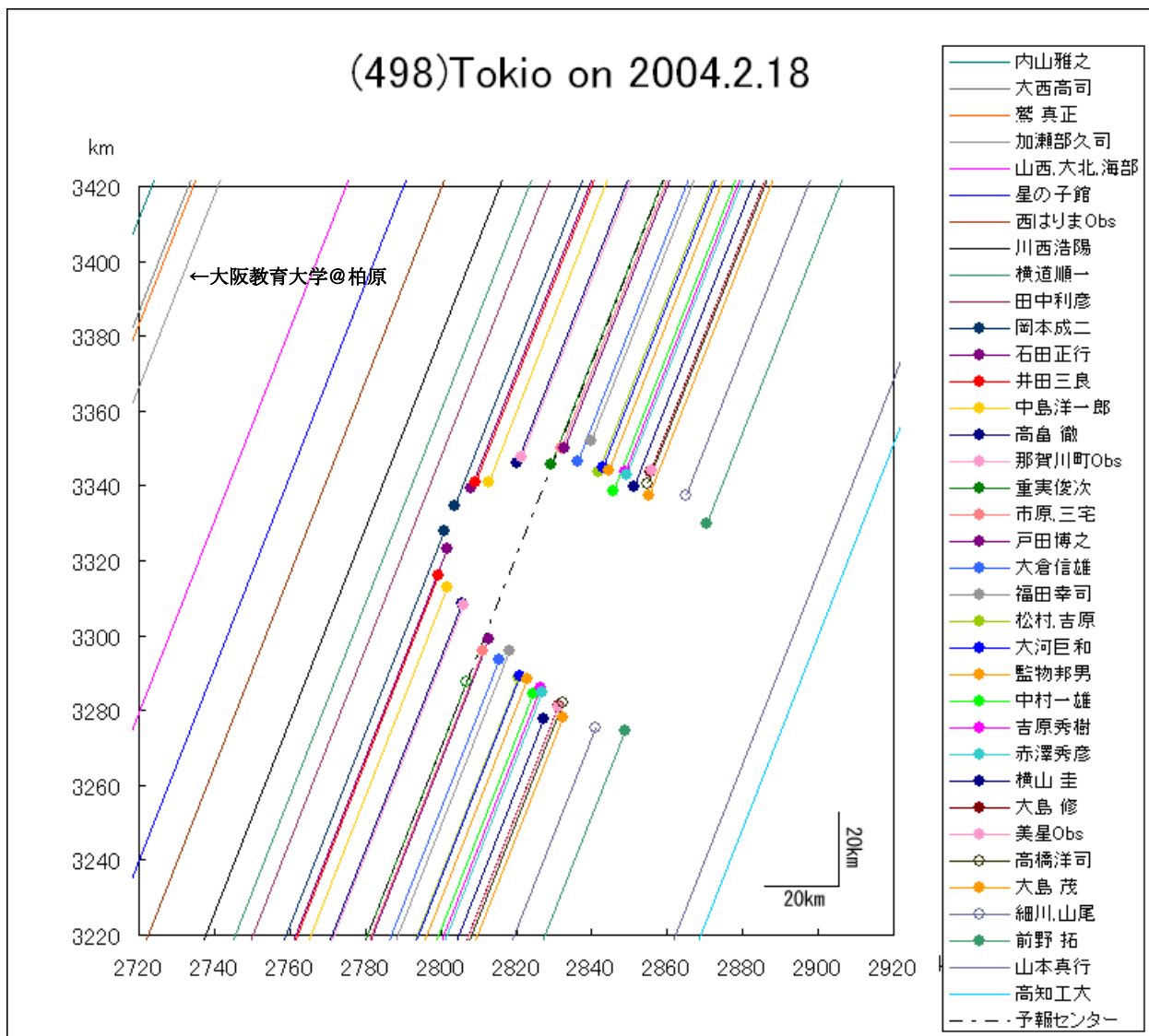
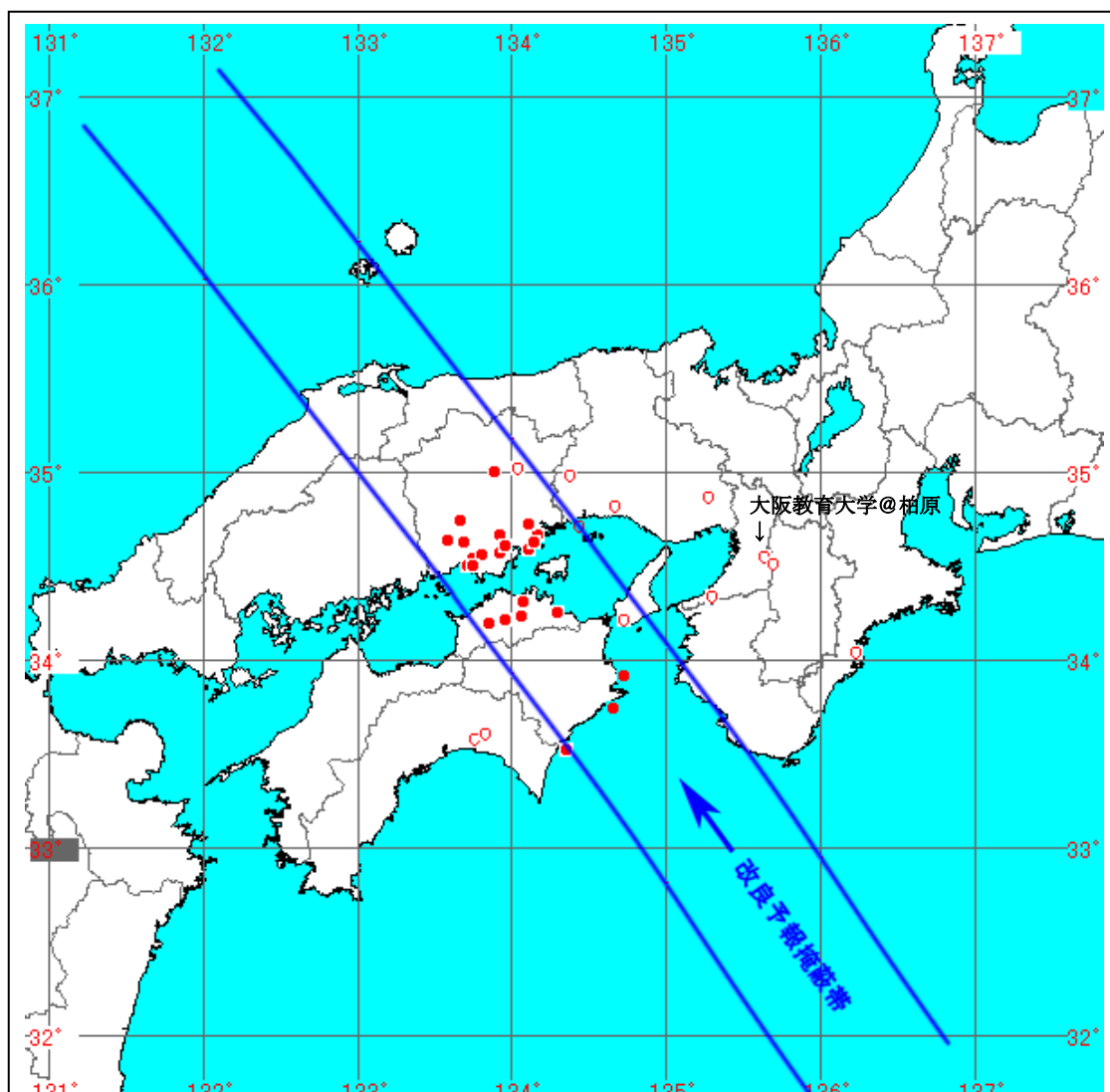
②ヒッパルコス星表の固有運動システムの誤差[(6)(7)]

ヒッパルコス星表は 1997 年に発表され、現在の可視光域の基準座標を与えているものである。対してこれまでの基本星表であった FK5 星表は数種類の独立した方法により国際天球座標系 ICRS との誤差が明らかになっている。この二つの星表を直接比較したとき、理論上検出されなければならない系統差よりも実際はかなり下回っていた。この事実は、ヒッパルコスの固有運動システムに予想を超える誤差が存在する可能性を示唆している。月の位置は精密なレーザー測距により ICRS に対して高い精度を有しているため、月の位置をヒッパルコスの座標系に対して求めることでヒッパルコスの固有運動システムの問題が解決できるはずである。そのためには星食の観測が最適の手段である。

2-3.小惑星による恒星の掩蔽

この現象は小惑星が恒星を隠す現象である。隠される恒星が小惑星よりも十分に明るい場合、掩蔽が観測されると突然恒星が消えたように見える。この観測は言い換えると恒星を隠す小惑星の影を地表から観測するということである。1 地点でこの掩蔽を観測しただけでは、影を横切る 1 本のラインの情報しか得られないが、複数の地点での掩蔽の有無や減光時間等の観測データが得られると小惑星の影の形が浮かび上がってくる。つまり、掩蔽を観測した地点が多ければ多いほど精密な小惑星の形が分かるのである。[1] 小惑星による恒星の掩蔽は 1958 年にスウェーデンで Juno による SAO112328 の掩蔽が眼視によって観測されたのが最初である。1975 年には Eros による kappa Gem の掩蔽が複数の地点から初めて観測された。以降 20 年間は予報の改良によりいくつかの成功例があったが、まだまだ予報の精度が悪く失敗も多かった。1997 年にヒッパルコス星表が発表されてからは予報の精度が飛躍的に上がり、[8] 2004 年末までに 636 件もの報告がされており、2004 年の 1 年間だけで 119 件の報告がされている。日本においても 1970 年代終盤から盛んにこの現象の観測を試みられるようになったが、確実な掩蔽の確認はならず、1983 年の井田三良氏の Dione による SA080228 の掩蔽の確認まで待たねばならなかったが、その後順調に伸び続けている。2004 年は 17 件の報告があった。

図：1958 年に初めて観測されてから 2004 年までの年別観測報告数

出展は IOTA の「OBSERVED MINOR PLANET OCCULTATION EVENT」による [9]

この観測の意義としては、前述の通り小惑星の形が明らかになることである。小惑星は非常に小さく直接その形を見ることは探査機が近づかない限り困難だからである。詳細なデータを得るには多くの観測地点が必要であるという点が、アマチュアに注目されている理由の一つである。

図：2004 年 2 月 18 日の小惑星 Tokio による恒星の掩蔽観測から浮かび上がった Tokio の楕円構造（せんだい宇宙館の HP より　整約はせんだい宇宙館早水氏による） [10]

図：発表されていた予報掩蔽帯と観測成功地点
赤丸は恒星の減光が確認された地点を示し、白丸は減光が確認されなかった地点を示す

2 種類の掩蔽観測とも、恒星が隠された時刻や、再び現れた時刻を正確に測定することが重要である。恒星が観測できさえすれば小望遠鏡でも大望遠鏡に劣らない精密なデータを得ることができる。望遠鏡の口径よりもむしろ時刻の精度が重要である。

3.観測装置

3-1.観測地の測定

掩蔽の観測をするにあたって、月や小惑星の位置や形を調べるにはこの望遠鏡の存在している天文台の位置を知らなければならない。そのためはじめに望遠鏡の精密な位置を調べた。大阪教育大学天王寺キャンパスは、大阪市天王寺区の天王寺ターミナル街の近くに位置している。位置を調べるにあたって、「大阪教育大学天王寺キャンパス天文台 2001～2002」[(11)] と WWW 上のサイト「地図センター」(http://www.jmc.or.jp/)内の「電子国土サイト」[(12)] を参照した。この web サイトは財団法人日本地図センターが運営しており、国土交通省国土地理院の電子国土 web システムを利用している。日本全国の地図を最大 2500 分の 1 の縮尺で閲覧できることの他に公共機関等さまざまな施設を検索することができる。この他に「地図閲覧サービス」(http://watchizu.gsi.go.jp/)[(13)] という web サイトでも経度、緯度を確認できる。

これらにより得られた経度、緯度、標高は次のとおりである。なお、標高はキャンパスの高さ（約 20m）を加味している。

経度：北緯　34°　38′　52″
緯度：東経　135°　31′　12″
標高：　30m
測地系：世界測地系

図:地図センター電子国土サイトによる天王寺キャンパス周辺図

3-1.20cm 屈折望遠鏡[11]

天王寺キャンパスに設置されている望遠鏡である。五藤光学研究所が 2001 年に製造したものである。概要を以下に記す。

①クーデ式架台

この望遠鏡の架台にはクーデ式と呼ばれる形式が採用されている。これは、屈折望遠鏡の内部にある 2 面の平面鏡を用いて天体の方向に関わりなく、焦点面が常に極軸の南側部に来るような構造をしている。

この形式は観測者が同じ位置で常に楽な姿勢で観測ができる点や、望遠鏡の位置とは無関係に容易に観測装置の取り付けが可能である点などさまざまな利点がある。

難点は、光学系が複雑であるだけ像の劣化があり、眼視による観測では視野が回転することである。

②光学系

1.対物レンズ

形式：ED アポクロマートレンズ

口径：200mm

焦点距離：1800mm

口径比(焦点距離/口径)：F9

2.平面鏡

個数：2 枚

口径：約 14cm×14cm、約 8cm×8cm

3.接眼部

この望遠鏡は切り替えにより二通りの焦点面が利用できる。一つは、極軸上の直焦点で二つ目は極軸に再び平面鏡を差し込んで、それに直角方向に像を結ぶものである。通常は前者の直焦点に観測機器を接続するが、今回はこの方法だと観測機器自体の重みで正確に天体を導入できない問題が出たため、広い視野を確認するための眼視用の接眼レンズとともに後者の方法で接続した。接眼レンズは最も倍率が低い焦点距離

60mm、倍率 33 倍のものを用いた。またこの方法は最大レボルバーに 3 個のレンズを取り付けることができ、CCD カメラでの視野と眼視での視野と即座に切り替えることができるという利点もある。

③駆動とコントロール

1.駆動装置

赤緯軸、赤経軸の駆動はステッピングモーターとコントローラーにより行われる。天体の追尾精度は±2.5″以下である。

2.ハンドボックス

操作命令は通常コンピュータから行われるが、それとは独立にハンドボックスにより照準が行える。駆動速度は Slew,Set,Guide の 3 種類があり、slew が最も速く、順に駆動速度が小さくなっている。

3.望遠鏡制御ソフト CATⅡ(五藤光学)

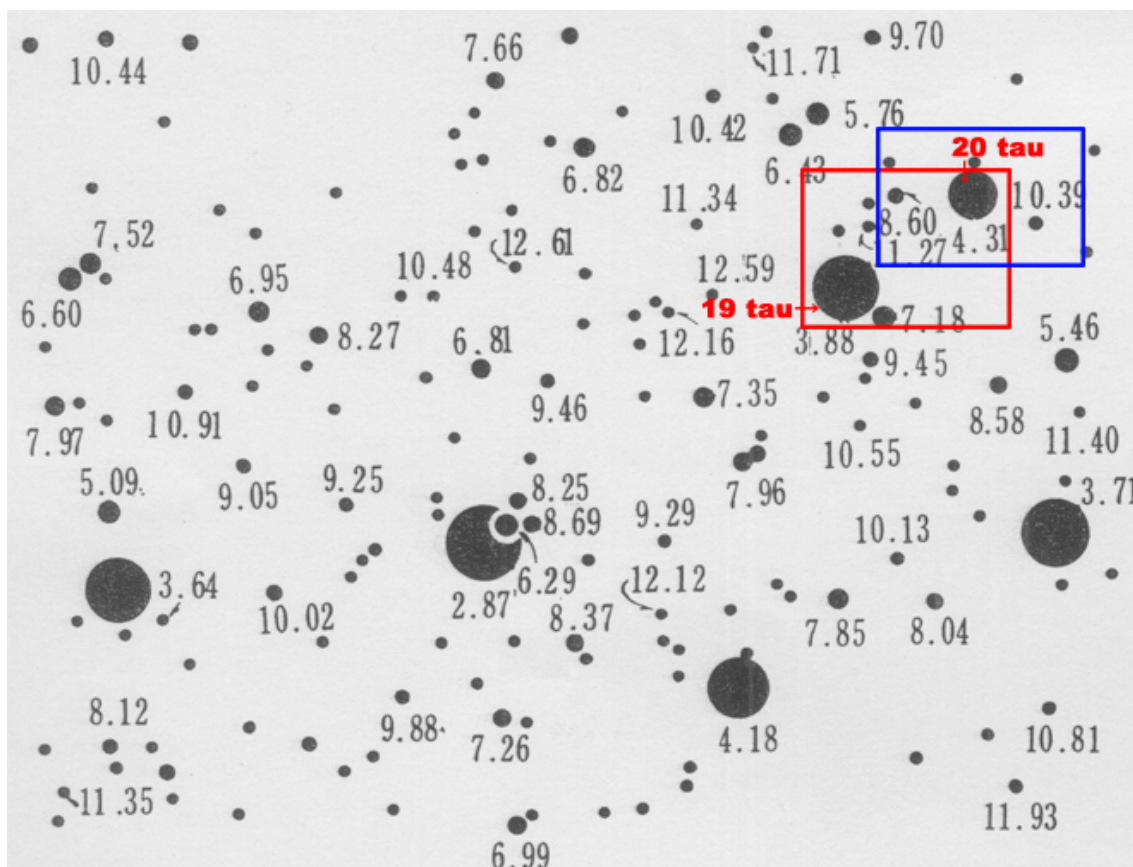
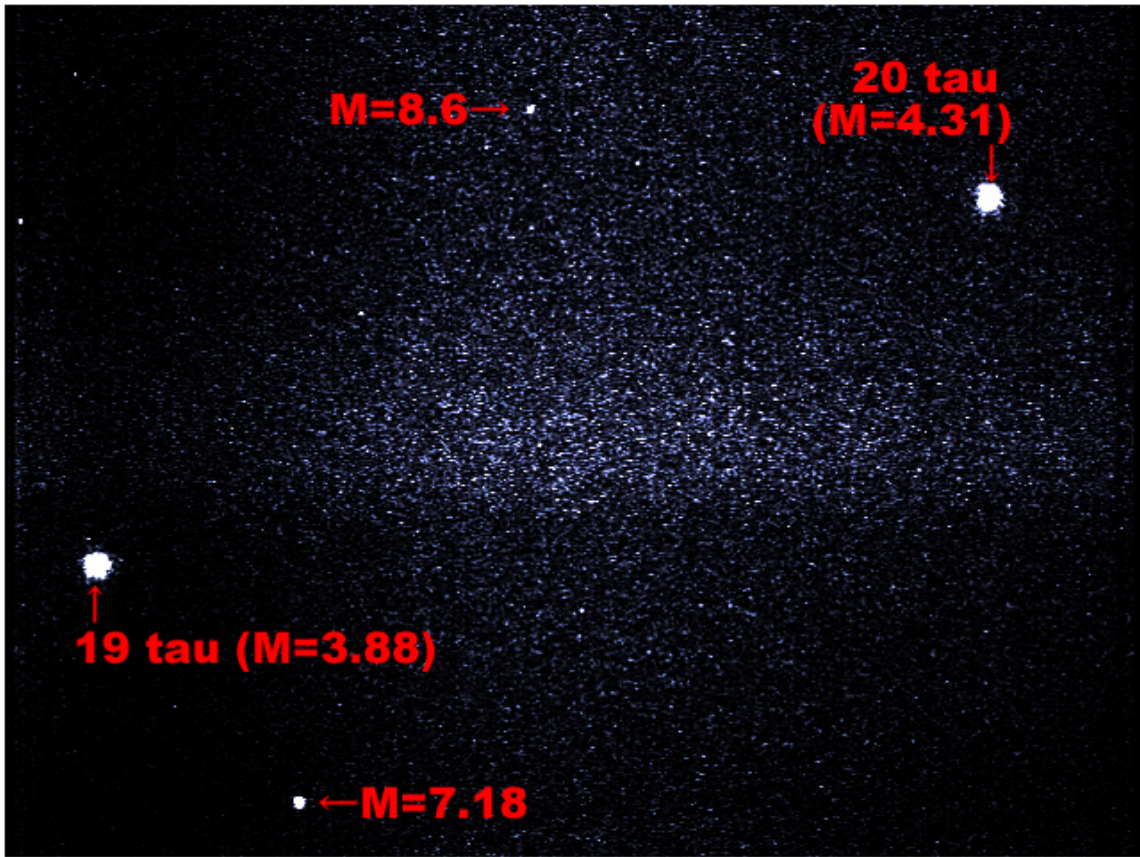
天体の導入は望遠鏡制御ソフト CATⅡで行う。このソフトは(株)五藤光学が開発したもので、制御用の専用コンピュータ(Microsoft Windows 2000 Server)にインストールされており、ここから指令が出される。

このソフトの一般的な使用方法として、PC 画面に観測地点と時刻に対応した星図が表現され、マウスで目的の天体をクリックすれば自動的に望遠鏡がその天体に標準される仕組みになっている。またデータベースも内蔵しており、太陽、月、惑星、恒星、非恒星天体(メシエ天体、NGC 天体)を選択することができる。さらに、赤経、赤緯を直接入力することで照準することも可能である。今回の観測は全て観測する天体の赤経、赤緯を直接入力して行った。

3-2.CCD カメラ

望遠鏡から集められた光をさらにこのモノクロ CCD カメラで集光、拡大する。映像はコンポジット端子によりいったん TIVi へ出力される。

掩蔽を観測する前段階としてこの望遠鏡と CCD カメラの組み合わせによりビデオに出力した際にどのくらいの視野が見えるのか、またどのくらいの等級の星まではっきりと見えるのかということを確認しなければならない。視野や等級を確認するには明るい星が密集しており、かつ等級を容易に知ることができる天体が適している。今回はすばるとして知られているプレアデス星団（M45）を用いた。

この図はすばる全体の図である。円の大きさと数字はその星の等級を表している。(14)
視野の測定にあたりすばるの図の中で赤く囲んでいる領域を用いた。

この画像は図の赤く囲んでいる領域を DV カメラで撮影、PC に取り込み色調補正を行ったものである。画面の上下左右に 4 つの恒星が確認できる。11.27 等の恒星は確認できなかった。

画面に左右に映っている 2 つの恒星の 2000 年分点における名前、赤経・赤緯を示す。

19 tau　：3h45m12.4s,+24°　28′　2″　（実視等級 3.88 等）

20 tau　：3h45m49.5s,+24°　22′　4″　（実視等級 4.31 等）

19 tau と 20 tau の間の視野の角度は、

$$\sqrt{(49.5-12.4)^2-(1324-1682)^2}=\sqrt{1376.41+128164}$$

$$\sqrt{129540.41}\fallingdotseq 359.9172''$$

と求められる。

この結果と、Photoshop 上での画像のサイズとを比較してこの画面の視野を求める。

225.78	: 191.6＝	X	: 359.9172
画面の横幅	2 星間の距離	画面横の視野	2 星間の視野角
(mm)	(mm)	(″)	(″)

191.6X=81262.105416

X≒424.123″ ≒7′　4″

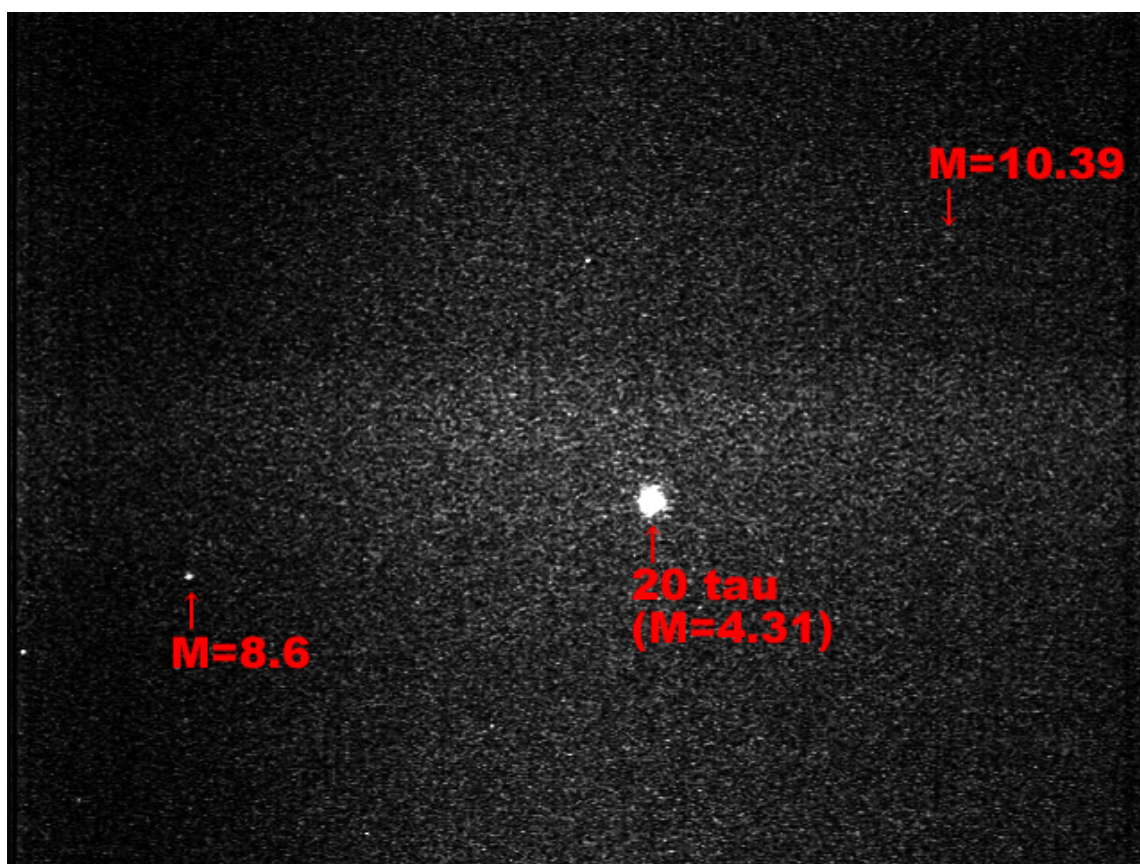
169.33 ： 191.6＝ Y ： 359.9172

画面の縦幅	2 星間の距離	画面縦の視野	2 星間の視野角
(mm)	(mm)	(″)	(″)

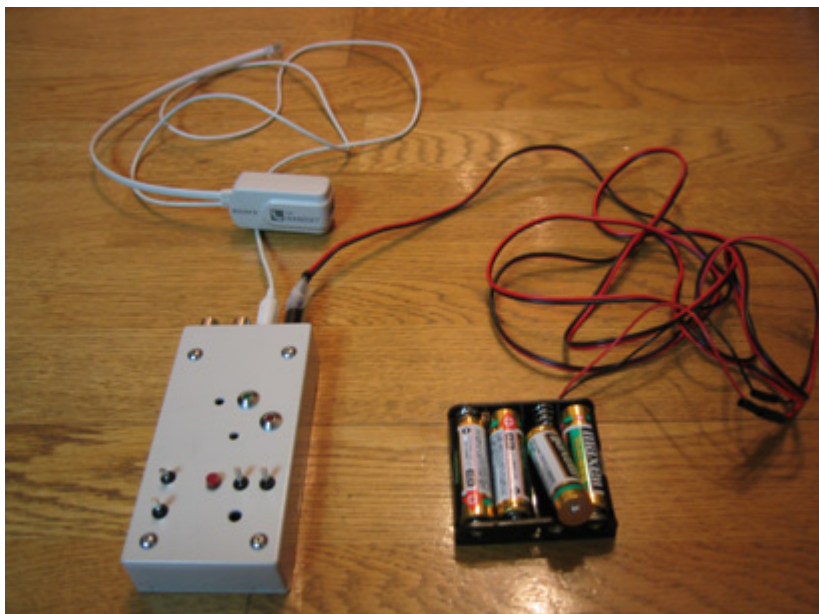
191.6Y=60944.779476

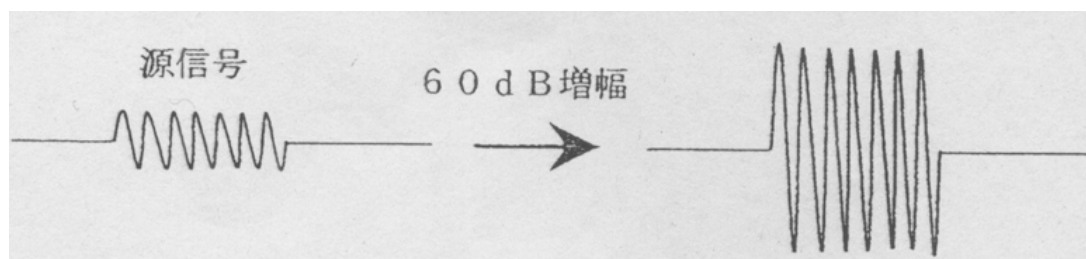
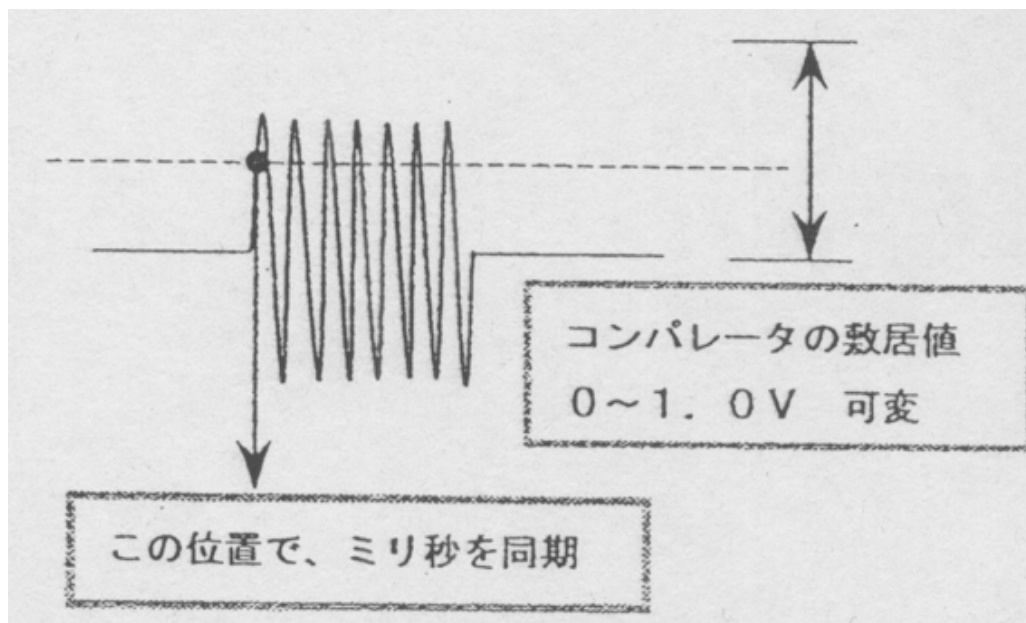
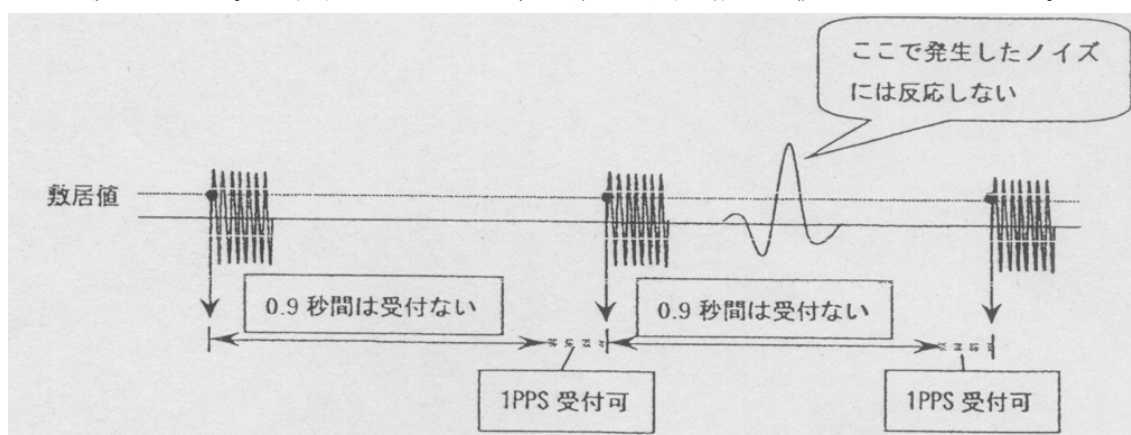
Y≒318.083″ ≒5′ 18″

以上のことから、この望遠鏡と CCD カメラで観測したときの画面の視野は横視野が 7′ 4″、縦視野が 5′ 18″ であることが分かる。

次にどのくらいの等級の天体まで観測できるかを確認した。

この画像は先程のすばるの全体図の中で青色で囲まれている部分である。

これより、この望遠鏡と CCD カメラの組み合わせで観測できる限界等級は 10.39 等である。ただし、限界等級は天候等にも大きく左右されるため、現実的には 10 等前後と考えられる。

3-3.TIVi（チビ：Time Imposer for Video）[15]

TIVi とは外部からの映像に年月日、時分秒、10 ミリ秒の時刻を付加し、それを高い精度で維持しながら出力するための装置である。カメラと録画装置との間に配置して使用する。単三乾電池 4 本で約 20 時間駆動する。1 秒の開始タイミングは手操作のほか、GPS 受信機や電話による時報など外部からの同期信号を利用できる。時報による同期の際は固定電話による同期が強く推奨される。固定電話による時報は誤差が約 0.03 秒だが、携帯電話や PHS による時報は約 0.2 秒前後の誤差があるためである。いったん同期させてしまえば TIVi 単体での使用も可能である。TIVi 単体での精度は月差 3 秒以内である。

TIVi の同期の考え方であるが、音声信号を前提として考えると、時報の音声信号は電圧レベルがたいへん低いため、この信号をまず 60db（1000 倍）に増幅する。この増幅された信号は GPS を利用した GHS 時計の場合で約 2V になる。

次にこの信号をコンパレータと呼ばれる比較器に通すことで、信号を検出して同期するための位置を決定する。本来コンパレータのしきい値は 0~1.0V の間で可変であるが、今回は TIVi 購入時の仮調整済みのままで固定して使用している。

以上の基準で 1PPS 信号（時報のピッ、ピッ、ピッという信号）を検出すると、その後 0.9 秒間は 1PPS 信号の受付をシャットアウトする。この 0.9 秒間に発生したノイズにも反応しない。こうすることにより、正確な時刻を維持し続けることができる。

3-4.テレホンピックアップアダプタ

電話の内容を音声として出力することができる装置である。本来電話の内容を録音しておくために作られたものである。TIVi はこのアダプタから出力される時報の信号を感知して時刻を同期させる。

3-5.SonyDV カメラ DCR-PC110

望遠鏡と CCD カメラから出力された映像はいったん TIVi を通って現在時刻が表示される映像として再出力される。その映像をこのカメラで録画する。DV カメラは DV テープに録画するためだけに使用しており、DV カメラについている撮影用の CCD カメラは使用していない。DV テープを使用した理由は映像の取り込みや解析が PC で容易にできるからである。録画の際には正確に解析できるように録画モードは標準速にて行った。

DV カメラの代替品として録画用に 8mm ビデオカメラや VHS ビデオデッキ、DVD レコーダー等も利用できる。

3-6.ビデオ映像解析、作業用 PC

カメラから DV 端子(i.link)を通して PC に取り込まれる。映像取り込み、解析用 PC の主なスペックは次の通りである。

CPU：AMD Athlon XP 2400+ (2GHz)

RAM：DDR333 512MB x2=1024MB (Dual Channel)

HDD：ATA133 80GB 7200rpm

4.観測方法

4-1.観測予報の入手

掩蔽観測をする前に、いつその現象が起こるかという予報を知らなければならない。月による掩蔽の場合は星食国際中央局（ILOC）[16] という星食のデータを管理している組織に自分が観測する場所のデータ（経度、緯度、標高）を送ると予報が送られてくる。予報には星食が起こる日付、時間、隠される恒星のデータ、観測の難易度等詳細なデータが記されている。

DATE TIME-UT P D M D H M S	H-92 REF NO	O	MAG	SP	PCT SNLT %	ELG o	SN AL o	MN AL o	MN AZ o	CA o	PA o	DM REF NO	SAO REF NO	ZC REF NO	RT. ASC. H M S	DECL. o ' "
10 07/18 16 22/R	12414	5	9.0	K5	37-	75		40	85	53N	321.2	+25 1875	80017		8 13 20.7	+25 18 08
10 07/19 58 56/R	12469	4	9.4	F8	36-	75		61	101	75N	299.3	+25 1884	80045		8 15 43.8	+25 08 26
10 08/17 17 34/R	13732	5	8.1	G5	28-	65		18	75	36N	343.0	+22 2041	80597		9 03 06.0	+22 14 32
10 08/19 38 25/R	13828	5	9.1	K0	27-	64		46	93	56N	323.5	+22 2050	80632		9 06 53.6	+21 59 50
10 08/20 08 50/R	13848	4	9.0	F8	27-	63	-11	52	98	65N	315.1	+22 2052	80638		9 07 31.8	+21 55 11
10 08/20 30 49/R	13856	3	8.8	G5	27-	63	-6	56	103	50S	249.8	+22 2055	80645		9 07 48.2	+21 36 45
10 09/17 41 17/R	14885	3	9.0		19-	53		11	76	84N	299.4	+18 2282	98820		9 52 39.9	+17 54 53
10 09/18 15 30/R	14898	3	9.2		19-	53		18	80	49S	252.2	+18 2284	98826		9 53 41.3	+17 38 14
10 09/19 42 54/R	14965	6	8.1	F2	19-	52		35	92	68S	272.1	+18 2291	98850	1456	9 56 10.3	+17 31 18
10 10/18 13 04/R	16014	3	8.7		12-	42		6	78	65N	321.5	+13 2290	99250		10 41 55.5	+12 51 45
10 10/19 10 04/R	16048	4	8.8		12-	41		17	86	59S	266.1	+13 2294	99263		10 43 20.5	+12 28 18
10 10/20 26 49/R	16122	3	9.5	K0	11-	40	-7	32	97	67N	320.0	+13 2299	0		10 45 52.1	+12 26 42
10 17/08 44 00/D	22217	3	8.5	B9	13+	43	-6	15	225	26N	39.9	-2412645	184277		16 16 40.6	-25 00 05
10 18/08 50 56/D	23371	3	8.3	A2	22+	56	-7	19	213	36N	43.0	-2711584	185274		17 20 23.9	-27 46 48
10 18/09 09 01/D	23396	3	9.5	B8	22+	56	-11	17	216	79N	85.8	-2711597	185293		17 21 22.0	-27 57 51
10 18/09 44 40/D	23432	4	8.3	A0	22+	57		12	222	87N	94.4	-2711604	185324		17 22 33.2	-28 00 32
10 18/10 00 11/D	23438	3	9.3	F0	22+	57		10	225	38N	45.2	-2711607	185330		17 22 44.2	-27 47 45
10 18/10 22 29/D	23465	5	5.4	K2	22+	57		7	228	59S	127.4	-2813081	185350	2505	17 23 38.0	-28 08 58
10 19/09 07 59/D	25280	3	9.0	K0	32+	70	-11	22	203	79S	100.5	-2914940	186812		18 26 44.7	-28 56 46
10 19/09 42 51/D	25308	3	9.2	F8	33+	70		19	210	66N	65.9	-2814598	186831		18 27 44.7	-28 45 18

図：ILOC から取り寄せた 2004 年 10 月 7 日から 19 日まで星食予報データ

主な予報データ

DATE TIME-UT：星食が起こる日付時間。世界標準時（UT）で表示されている。日本時間に直すために 9 時間を加える

予報時刻の後ろの記号（R／D）：掩蔽の種類。R が月からの出現、D が月への潜入を表す

H-92 REF NO：H-92 星表における星の番号

O：星食観測の難易度。「0」が観測不可能で「9」が最も観測しやすい

MAG：恒星の実視等級

SP：恒星のスペクトル型

PCT SNLT：月の輝面率。月がどのくらい輝いているかを表している。単位％

MN AL：その時の月の高度

SAO：SAO 星表における恒星の番号

RT. ASC. , DECL.：恒星の赤経、赤緯

小惑星による掩蔽の場合は予報を出している各 web サイトを参考にした。IOTA（The International Occultation Timing Association）[17]による改良予報を掲載しているせんだい宇宙館のホームページ[10]をはじめ、瀬戸口貴司氏のホームページ[18]、佐藤勲氏の Minor Planets at 366[19]等である。小惑星の軌道や大きさについてはまだよく分かっていないものが多いため、掩蔽観測が可能な地域を示す他にエラーバーが付けられている。隠される恒星のデータや周りの視野の確認については、Simbad[20]とよばれる天体のデータベースより調べた。

図：IOTA から発表された 2004 年 10 月 2 日小惑星 Lumen による TYC2434-00775-1 の掩蔽の予報データ

主な予報データ

141 Lumen occults TYC 2434-00775-1 on 2004 Oct 02 at 17h 19m to 17h 33m UT

：小惑星 Lumen による TYC2434-00775-1 の掩蔽　予想時刻 2004 年 10 月 2 日 17 時 19 分から 33 分まで（世界標準時）掩蔽帯に書いてある数字は分を表す

Star（2000）：恒星についての情報

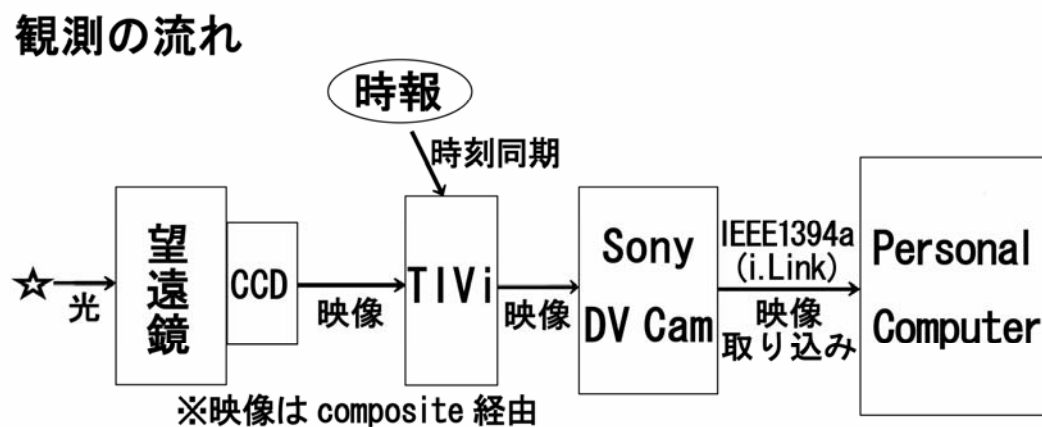
Mv：恒星の実視等級　RA：恒星の赤経　Dec：恒星の赤緯

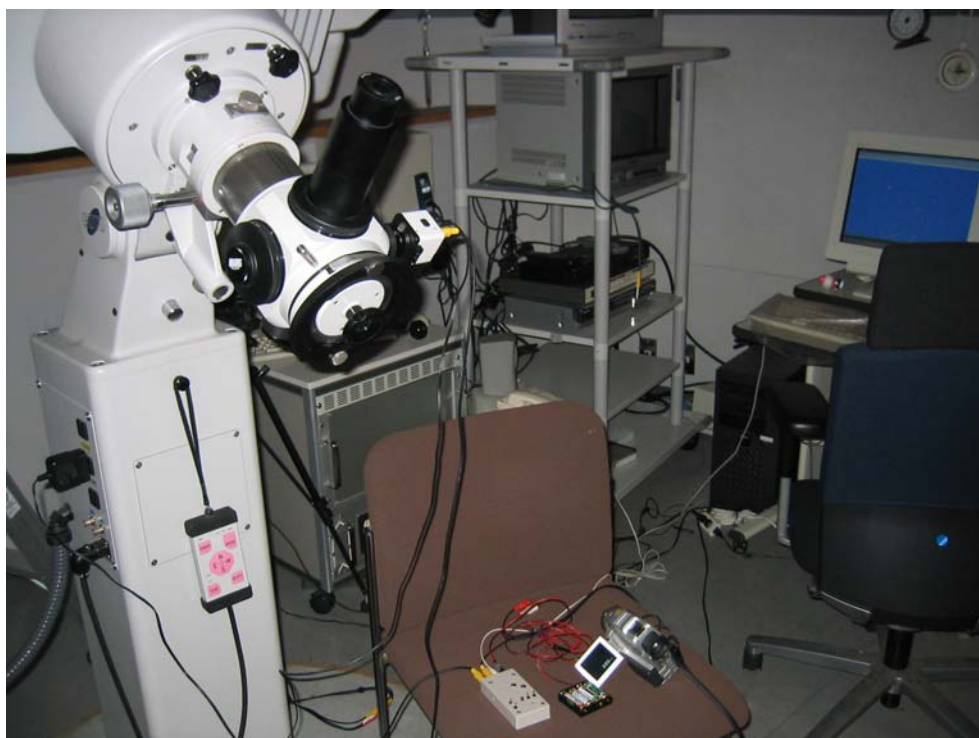
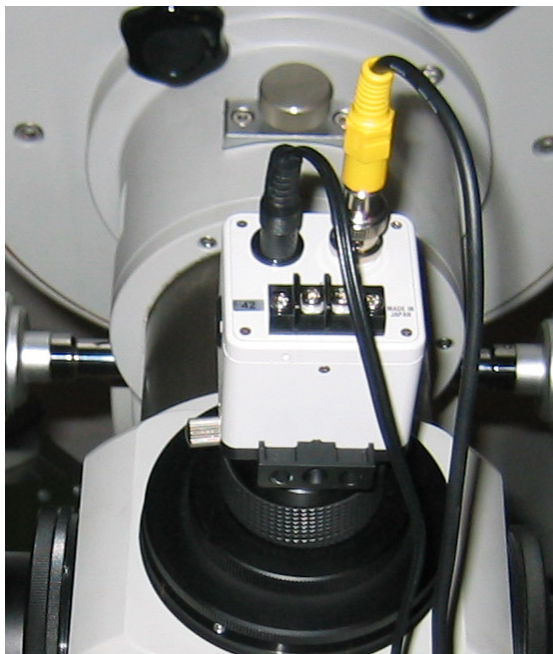
Max Duration：掩蔽が継続する最大時間

Mag Drop：掩蔽によりどれくらい恒星の光度が減光するか

illum：月の輝面比。0％で新月、50％で半月、100％で満月をあらわす。

半月，100%で満月です。 Asteroid：小惑星についての情報
　Mag：小惑星の実視等級　Dia：小惑星の直径

4-2.観測の流れ

この図は観測の一連の流れを示したものである。観測する星の導入前に、視野がどれくらいずれているかを確認するために望遠鏡制御ソフト CATⅡを使って明るい恒星を先に導入しずれを確認する作業を行った。

望遠鏡と CCD カメラにより撮影された映像は、時刻を同期させた TIVi を通り年月日と時間が付加される。それを DV カメラへ出力する。i.link 経由で DV カメラを PC に接続し、PC に映像を取り込む。

①観測機器全体（望遠鏡には眼視用のレンズと撮影用の CCD カメラが装着されている）

②望遠鏡と CCD カメラ（右の黄色のコンポジット端子から映像が出力される。
左は電源ケーブル）

③TIVi と DV カメラ（左端の黄色のコンポジット端子から映像が入力され、隣の端子から DV カメラへ出力される。白いケーブルの先にはピックアップアダプタがある）

④取り込み･解析用 PC 写真、使用アプリ（PC と DV カメラは i.link で接続される）

5.解析

5-1.映像の取り込み

DV カメラからの映像の取り込みには Microsoft が Windows 向けに開発している「Windows ムービーメーカー」用いた。このアプリケーションにより、DV テープの映像を Windows 標準の動画形式である AVI 形式の動画として取り込める。映像の解析は動画編集ソフトの「TMPGEnc」を使用した。

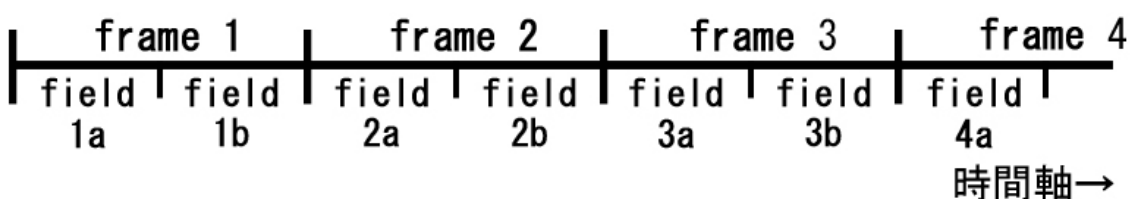
5-2.インターレースとは(21)(22)

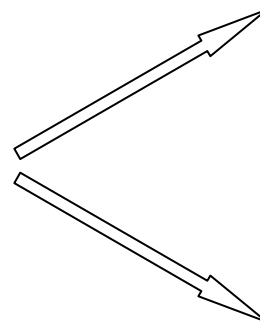
下の画像は観測映像をキャプチャした画像の一部である。

画像をよく見ると、時刻の秒とミリ秒の部分の表示の数字が二重に表示されている。これはテレビやビデオの映像がたくさんの水平の線（走査線）から成り立っていることに起因している。日本が使用している映像方式 NTSC 方式の場合 1 フレーム（1 画面）は 525 本の走査線からなっている。水平走査は 1 本おきに行われ、最初に走査線の奇数番目だけを走査し、次に飛ばした偶数番目を走査することになっている。こうした走査の仕方を飛び越し走査（インターレース）と呼ぶ。映像信号の奇数番目の走査線だけからなる部分を奇数フィールド、偶数番目からなる部分を偶数フィールドという。奇数及び偶数の 2 つのフィールドを合わせることで一枚の完全な画像（フレーム）が得られる。

frame 1 frame 2 frame 3 frame 4

field 1a field 1b field 2a field 2b field 3a field 3b field 4a

時間軸→

フィールド a

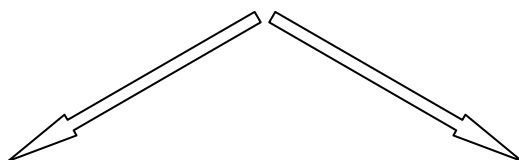
1 フレーム

動画上ではどちらが奇数フィールドか偶数フィールドか決定するのが困難であるため、ここではフィールド a とフィールド b として表している。フィールドを分けた後にも二重線が入っているのは解析ソフトが前後のフレームのフィールドと合成しているからである。

フィールド b

テレビやビデオなどの映像は 1 秒間に 30 枚のフレームから成り立っていることはよく知られている。通常はビデオデッキなど再生機器でコマ送りをすることにより 1/30（0.0333…）秒の精度でタイミングを決定できるが、PC に取り込んで 1 枚のフレームをさらに 2 つのフィールドに分けることで 1/60（0.0166…）秒という非常に高い精度でタイミングを決定することができる。

5-3.インターレースの解除

PC 上でインターレースな映像を扱う際、PC のディスプレイはほとんどがテレビやビデオの映像信号で使われているインターレース方式ではなくノンインターレース方式（プログレッシブ方式）であるので解析を行う際にタイミングの決定を困難にする。このためインターレースの解除を行った。奇数フィールドか偶数フィールドのどちらかの表示を消す（解除する）ことにより、ノンインターレースの画像に変えることができるのである。こうすることで数字が二重になっていた表示がはっきりと読み取ることができる。

インターレース解除前（前頁のフィールド b の画像）

奇数フィールド解除後

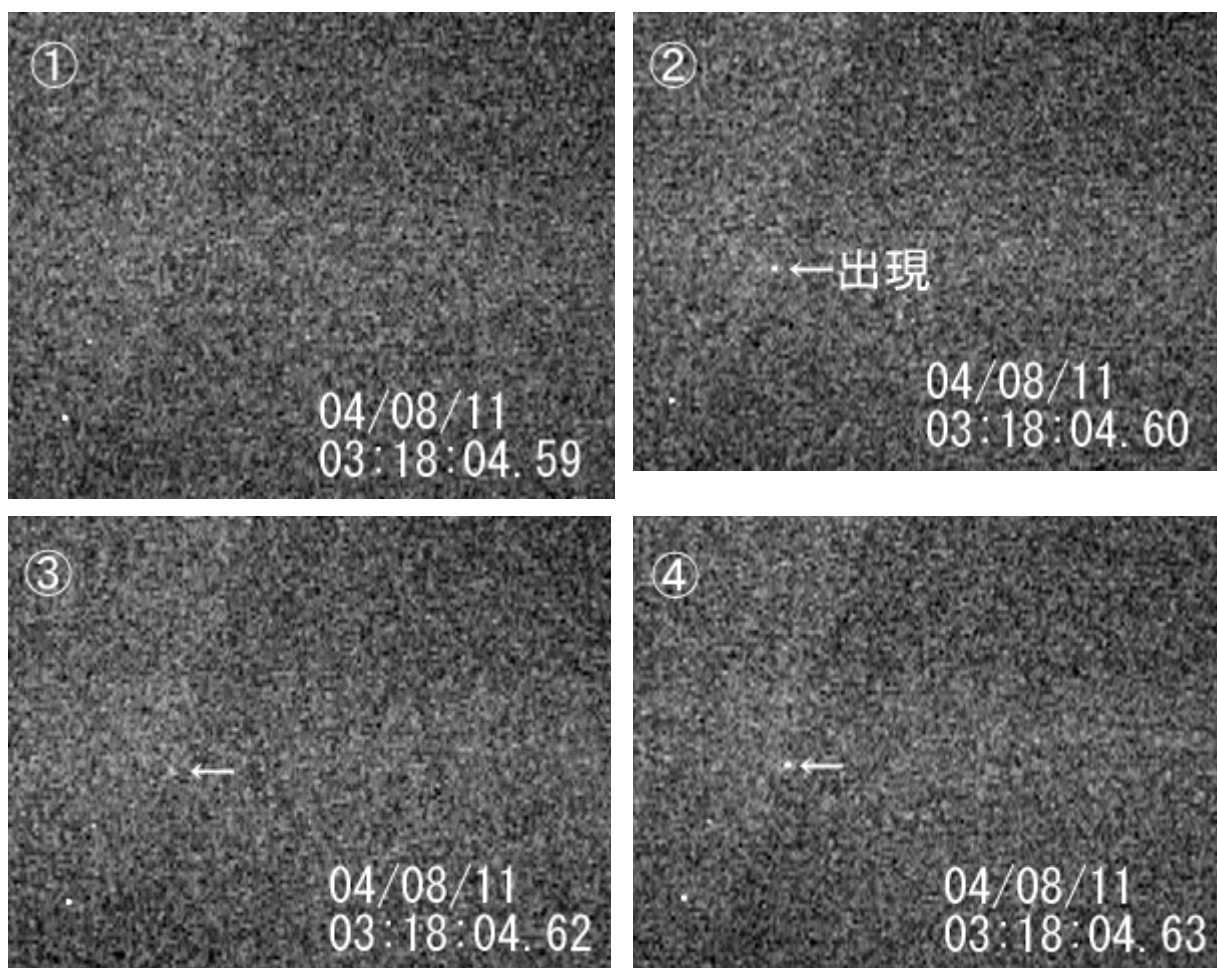
偶数フィールド解除後

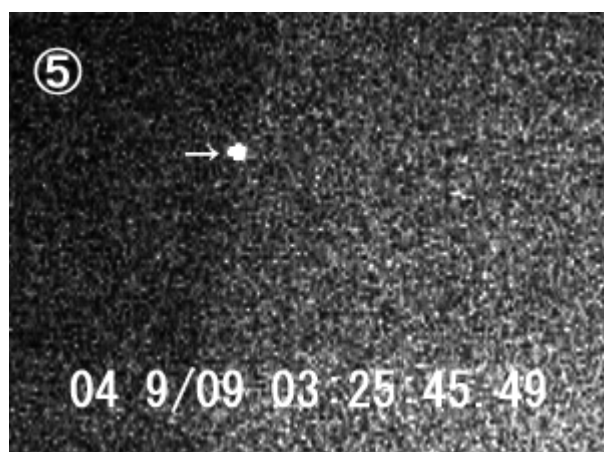
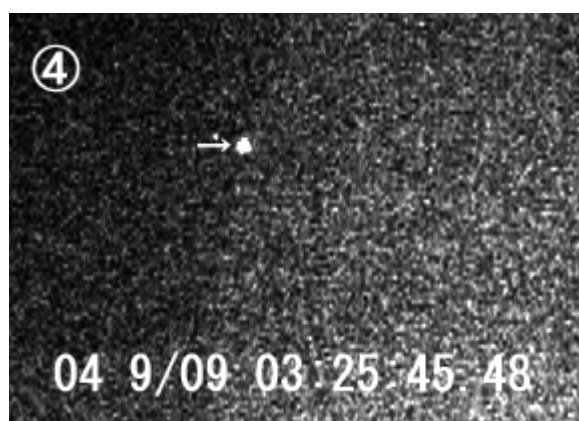
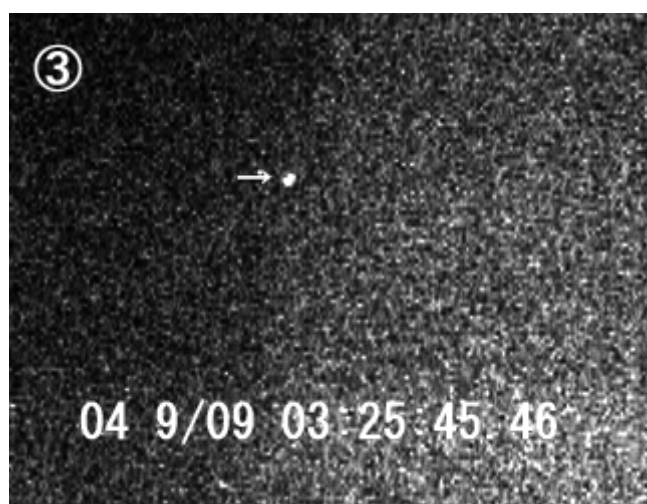
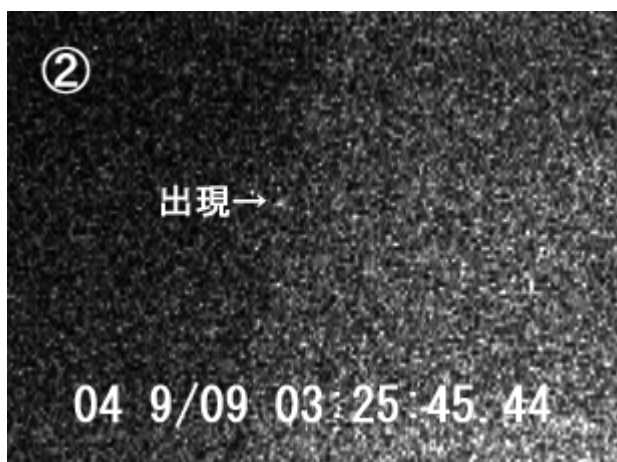
5-4.月による恒星の掩蔽時刻の解析

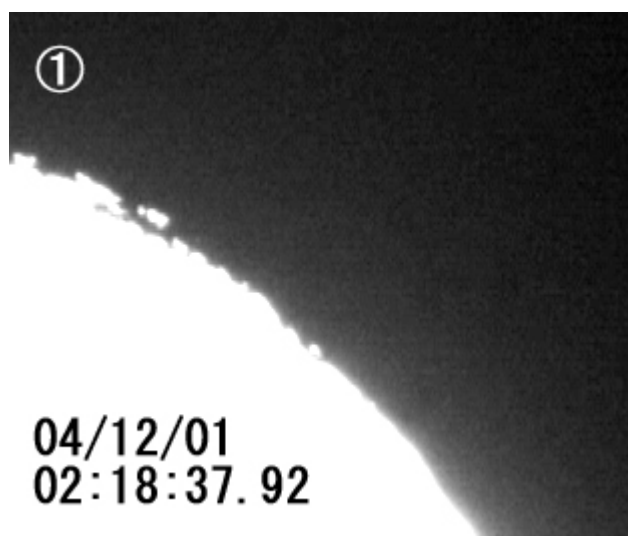
月の星食は合計 8 回の観測に成功した。内訳は月からの出現が 5 回と月への潜入が 3 回である。解析方法としては、PC に取り込んだ動画を TMPGEnc に読み込ませてからフィールドごとに分解し、インターレース解除を行ってから正確な掩蔽時刻を決定した。以後の画像には掩蔽現象が分かりやすいように Photoshop で画面を切り取ってから色調補正したものを掲載している。

① 2004 年 8 月 11 日 2 時 41 分 15 秒ごろの星食（恒星の実視等級 8.5 等）

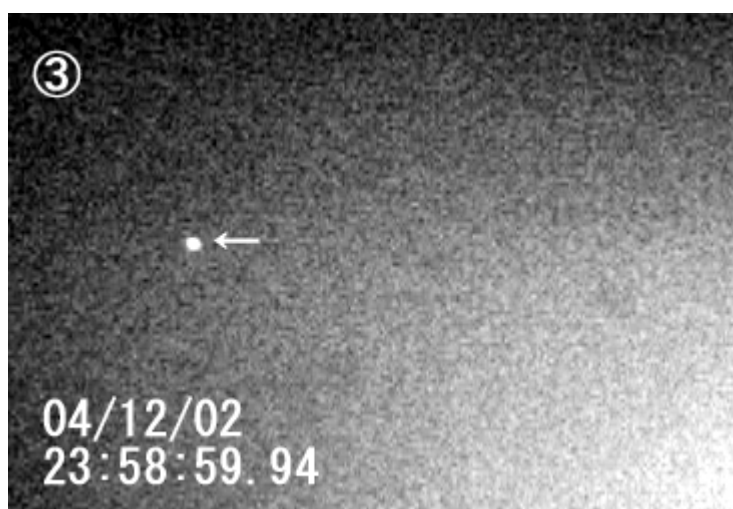
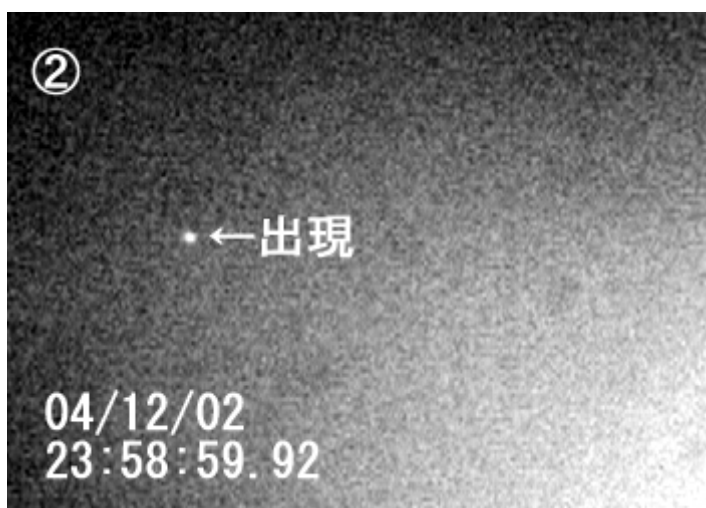
2:41:15.18 では見られなかった恒星が 0.02 秒後の 15.20 のフィールドで出現し、以後 15.21 のフィールドでも確認できる。以上のことからこの星食の時刻は 02:41:15.20 であることがわかる。

②2004 年 8 月 11 日 3 時１8 分 4 秒ごろの星食（実視等級 8.2 等）

3 時 18 分 4.59 秒には見られなかった恒星が 0.01 秒後の 4.60 秒に出現し、以後も確認できる。このことから出現時刻は 3 時 18 分 4.60 秒であることがわかる。

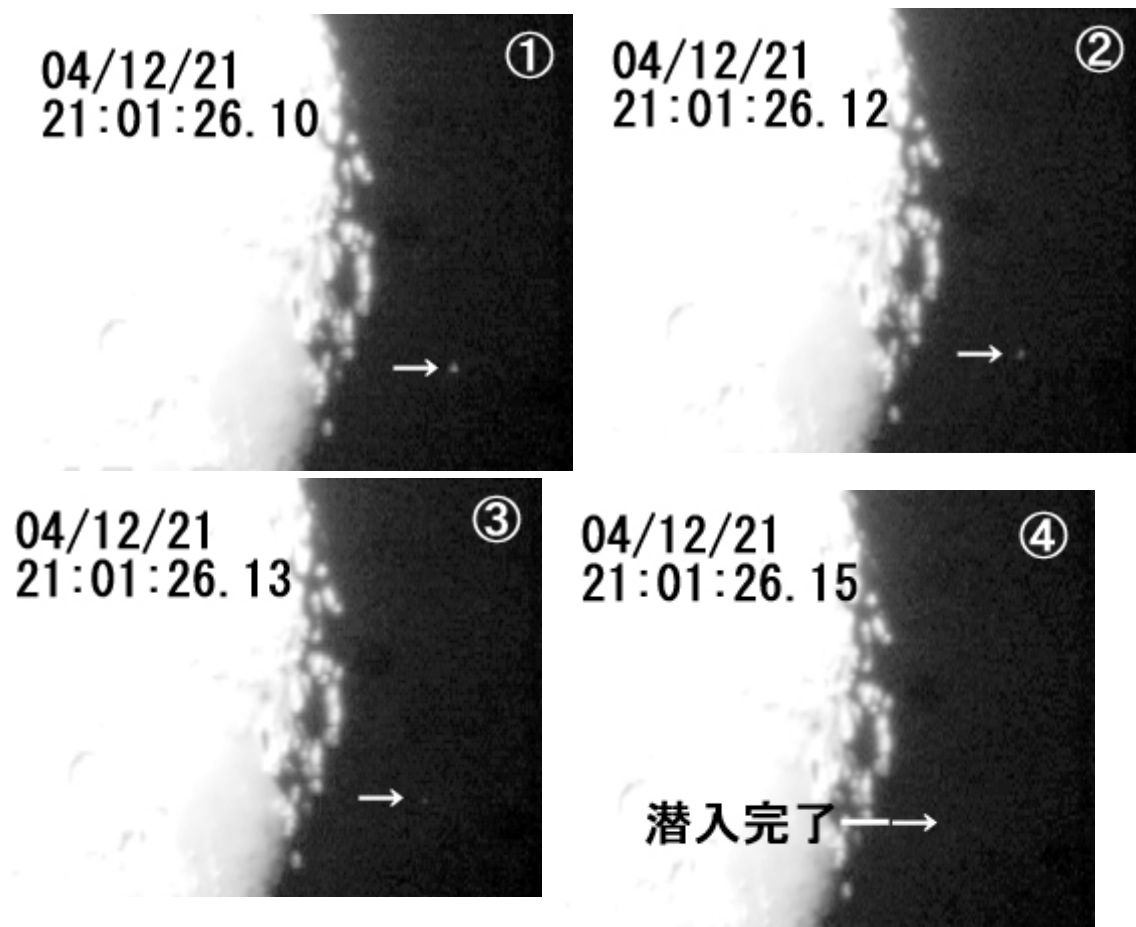
③ 2004年9月9日3時25分45秒ごろの星食（実視等級6.8等）

3時25分45.43秒では確認できなかった恒星が0.01秒後の45.44秒には確認できる。このことから星食時刻は03:25:45.44である。出現のあと増光していき、45.49秒以降は一定の光度になった。これは恒星が月から出始めて出終わるまでを記録したものである。

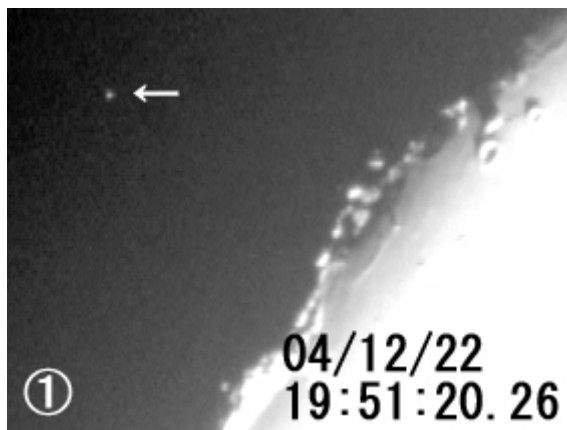
④2004 年 12 月 1 日 2 時 18 分 37 秒ごろの星食（実視等級 4.1 等）

2 時 18 分 37.92 秒では見えていなかった恒星が 37.94 秒にかすかではあるが出現している。その後この恒星はかなり長い時間をかけて光度を増し、38.12 秒以降一定の光度になった。

⑤2004年12月2日23時53分58秒ころの星食（実視等級6.1等）

23時58分59.90秒には見えていなかった恒星が0.02秒後の59.92秒に出現している。このことから出現時刻は23時58分59.92秒であることが分かる。ちなみに月の光が入って全体的にぼやけた画像になっている。

⑥2004 年 12 月 17 日 21 時 3 分 47 秒ごろの星食（実視等級 5.9 等）

21 時 3 分 47.30 秒ごろから潜入を開始し、だんだん恒星が暗くなっていくのが確認でき、47.49 秒で完全に見えなくなった。これよりこの星食の時刻は 21 時 3 分 47.49 秒である。

⑦2004 年 12 月 21 日 21 時 1 分 26 秒ごろの星食（実視等級 7.5 等）

月が明るく恒星の光がかなり見にくいが、21 時 1 分 26.10 秒ごろより潜入を開始し、21 時 1 分 26.15 秒ごろに潜入を完了した。

⑧12 月 22 日 19 時 51 分 20 秒ころの星食（実視等級 5.3 等）

19 時 51 分 20.26 秒ごろから潜入を開始し、
19 時 51 分 20.29 秒ごろに潜入を完了した。

以上 8 回の星食の観測に成功した。そして撮影した動画を解析することにより正確な掩蔽の時刻が決定できた。このデータを ILOC に送ることでこの星食に関する整約結果が得られる。ILOC に送ったデータは次の通りである。

観測地名：大阪教育大学天王寺キャンパス
(OSAKA EDUCATION UNIVERSITY)
住所：大阪市天王寺区南河堀 4-88
(OSAKASHI TEN-NOJIKU 4-88 MINAMI KAWAHORIMACHI,OSAKA PREF.)
連絡先：g016763@ex.osaka-kyoiku.ac.jp
観測者名：田中謙一(TANAKA KEN'ICHI)
望遠鏡の型：屈折望遠鏡
　　口径：20.0cm
　　焦点距離：180.0cm

望遠鏡の場所（経度　緯度　標高　測地系）: 135 31 12.0 E　34 38 52.00 N　30　WGS84

観測年月日及び時刻（世界時で）
星名（星表名）: 予報時に示されている H-92 星表は海上保安庁海洋情報部で編集した星食観測用星表番号であり、米国海軍天文台（USNO）星表と完全に一致している。報告の際には USNO 星表（報告では記号 X）を使用した。

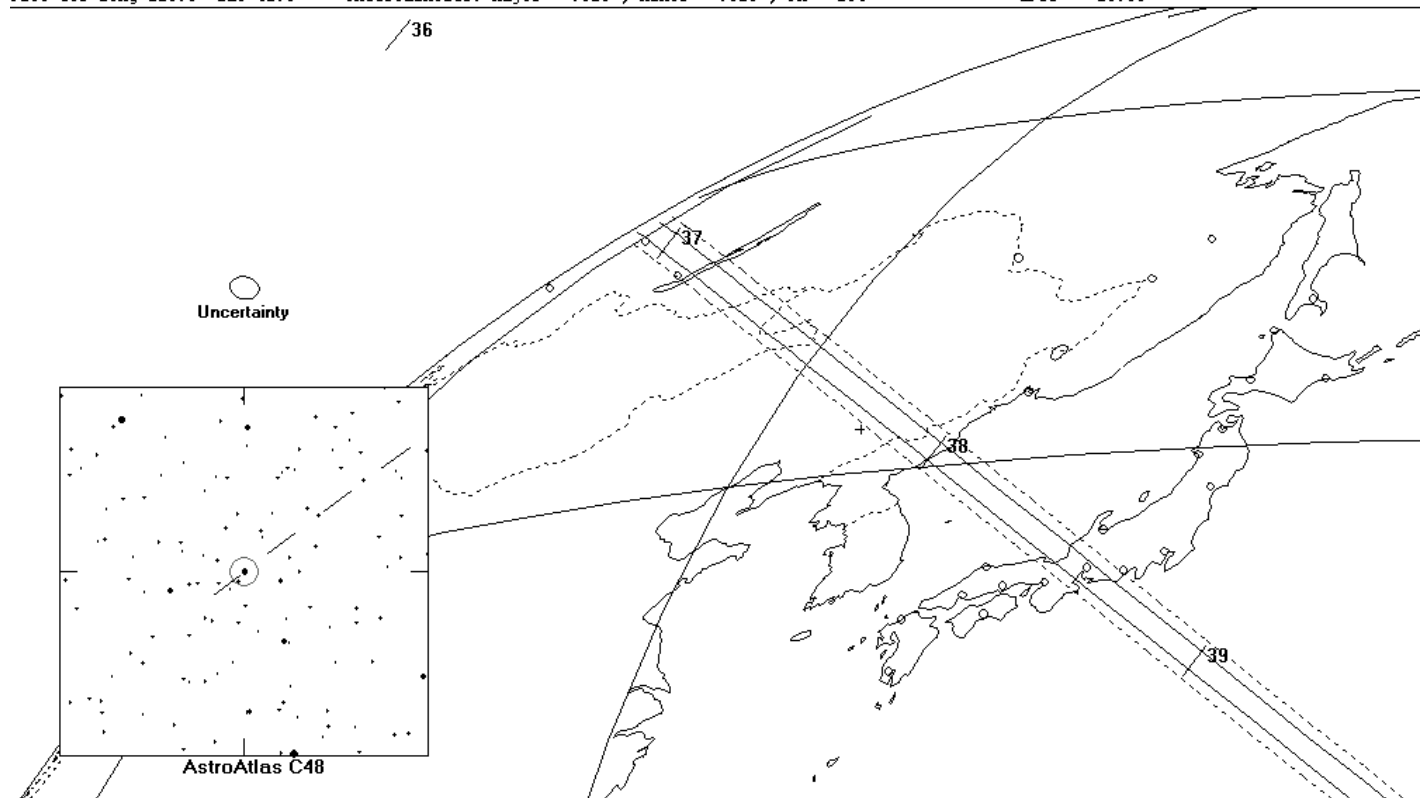
現象：1（明縁における潜入）
　　2（明縁における出現）

測定及び記録法：C（カメラと時計）
保持法：T（電話報時）
個人差：E（この測定法(ビデオカメラ)では個人差を考慮する必要は無い）
精度：0.03（秒）
確かさ：1（現象は確かである）
明視度（星像の安定度）: 1（良い）、2（やや悪い）、3（悪い）
明視度（空の透明度）: 1（良い）、2（やや悪い）、3（悪い）

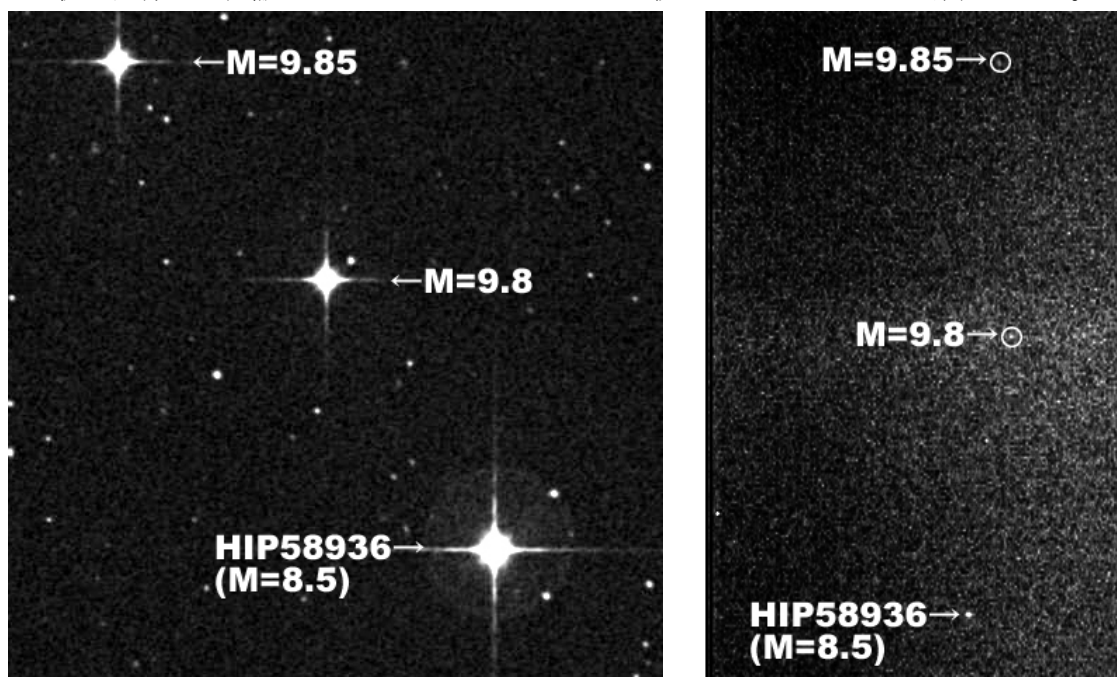
```
PLACE NAME     OSAKA EDUCATION UNIVERSITY, TEN-NOJI CAMPUS
ADDRESS        OSAKASHI TEN-NOJIKU 4-88 MINAMI KAWAHORIMACHI,OSAKA PREF.,
E-MAIL ADDRESS g016763@ex.osaka-kyoiku.ac.jp
REPRESENTATIVE TANAKA KEN'ICHI
REPORTED TO    ILOC

TA  RAD  20.0  180.0  135 31 12.0  E  34 38 52.00 N   30  WGS84

OA  TANAKA KEN'ICHI

REPORT NO.1
01  04081017411520 X   6698TOGC1      2 CTE  0031   11                    AAA
02  04081018180460 X   6735TOGC1      2 CTE  0031   11                    AAA
03  04090818254544 X   6763TOGC1      2 CTE  0031   11                    AAA
04  04113017183794 X  11372TOGC1      2 CTE  0031   11                    AAA
05  04120214535892 X   1199TOGC1      2 CTE  0031   11                    AAA

REPORT NO.2
03  04121712034749 X  31074TOGC1      1 CTE  0031   11                    AAA
04  04122112012615 X   2827TOGC1      1 CTE  0031   11                    AAA
05  04122210512029 X   3761TOGC1      1 CTE  0031   11                    AAA
```

図：実際 ILOC に送ったデータ　REPORT NO.1 と NO.2 の二回に分けて送った。

5-5.小惑星による恒星の掩蔽時刻の解析

小惑星による恒星の掩蔽は、掩蔽自体を観測することはできなかったが、小惑星が恒星の前を通らず、減光しなかった（減光なし）観測は成功した。これは 2004 年 12 月 21 日小惑星 Latona による HIP58936 の掩蔽である。まず IOTA より発表された予報を以下に示す。(17) 予報では日本時間 2004 年 12 月 21 日 4 時 37 分から 48 分まで掩蔽が観測でき、日本では 4 時 38 分から 39 分までの間で観測できるとある。恒星 HIP58936 の実視等級は 8.5 等、小惑星 Latona の実視等級は 14.4 等であり、最大 3.9 秒間にわたって恒星が 5.9 等減光されて観測される。

このように予報の時点では大阪は掩蔽の予報範囲外となっていたが、予想掩蔽帯から外れた地域で掩蔽が観測されることもしばしば見られるので観測を行った。

掩蔽観測を行う前に望遠鏡で導入している星が本当に HIP58936 であるかを確認しなくてはならない。そのためまず Simbad のデータベースから HIP58936 の星図を調べ HIP58936 とその周りにある比較星が今観測している映像に映っているかどうかを確認した。

以下の画像はSimbadから入手した星図と天王寺での映像をキャプチャしたものである。2枚の画像とも掩蔽されるHIP58936と2つの比較星が映っているのが確認できる。

左図 : Simbadデータベースより引用した星図 引用した星図はhip58936_SERC/J/DSS1
右図：天王寺望遠鏡で撮影した映像から作成

掩蔽予定時刻の前後20分ほど観測したが、減光は見られなかった。

この観測結果をせんだい宇宙館に送ることで整約結果が得られる。送ったデータは、観測者名、観測地、減光の有無、観測機材、時刻保持の方法である。

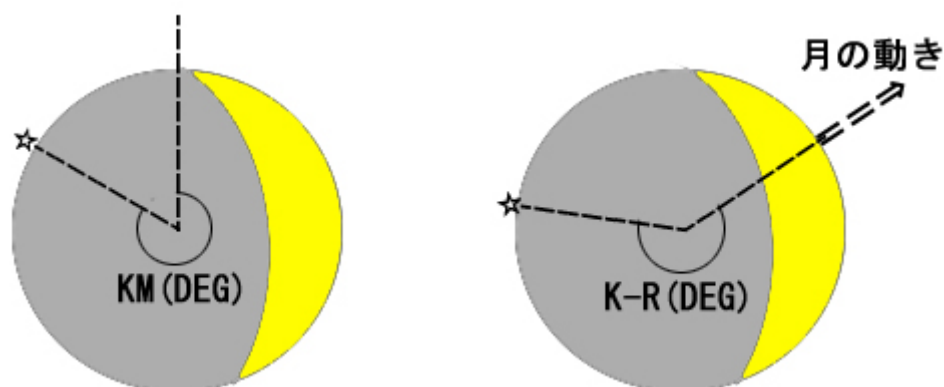
6.結果

6-1.月による恒星の掩蔽の整約結果

ILOC にデータを送ると約 1 週間で仮整約結果が返信される。他の星食観測者のデータを含めた本整約は ILOC の web サイトで閲覧することができる。(16)

仮整約の内容は ILOC に結果を送った際の観測データに整約が付加されている形になっている。

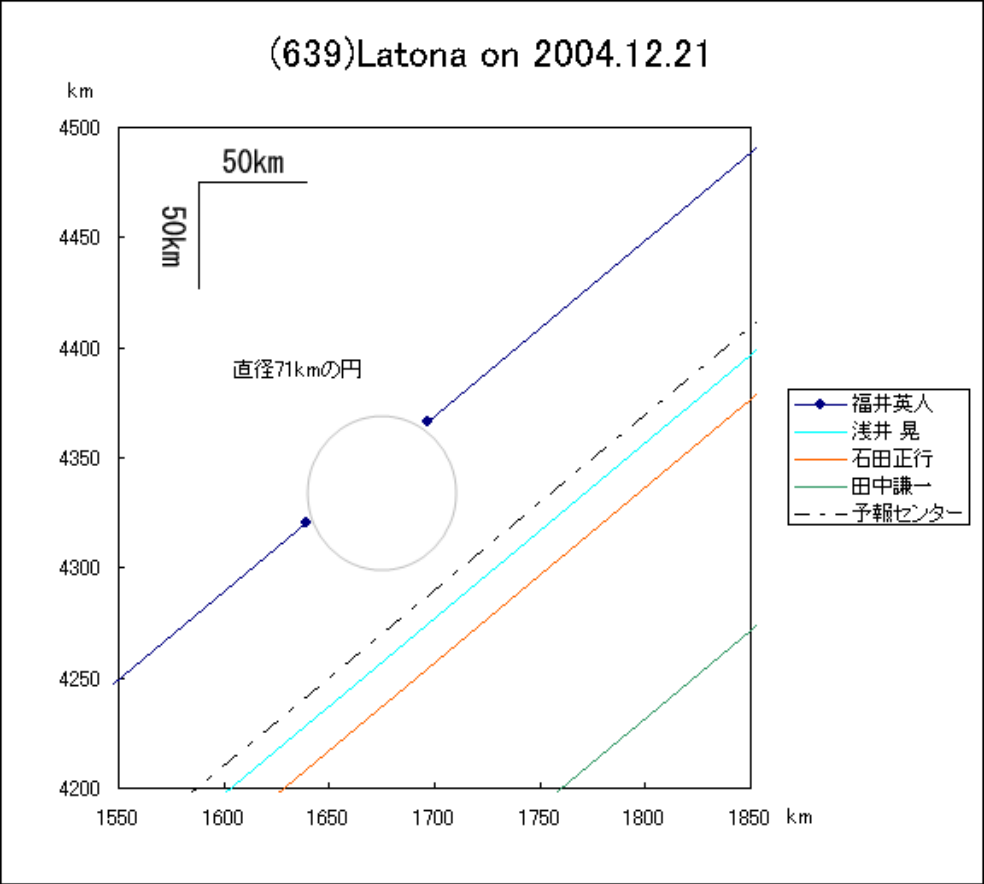
TEL CODE,OBS CODE：ILOC で管理するための番号
LOCATION：観測地の場所（経度　緯度　標高(測地系)）
TELESCOPE：望遠鏡の概要（口径　焦点距離　型）

DATE：星食の起こった日付
TIME(UTC)：星食の起こった時刻（世界標準時）
AGE：星食が起こった際の月の月齢
CT：報告の際に使用した星表の種類
STAR NO.：星表における恒星の番号
MAG：恒星の実視等級
PH：星食の種類
STN：観測地の分類番号
TEL：望遠鏡の分類番号
OBS：観測者の分類番号
REC：記録装置の分類番号
O-C：星食位置の観測値と計算値の差　単位秒角 (23)
WH：星食が起こった場所におけるワッツの月縁図による月の高度　単位秒角
K-R：星食の起こった場所が月の進行方向に対して右回りで何度の位置にあるか　単位度
KM：星食の起こった場所が月の北側から右回りに何度の位置にあるか　単位度

INTERNATIONAL LUNAR OCCULTATION CENTER (ILOC) PRELIMINARY REDUCTION OF LUNAR OCCULTATION OBSERVATIONS
TEL CODE 1 LOCATION(E135 31 12.00 N34 38 52.00 30.0M (DM 84 WGS84)
TELESCOPE(AP 20CM FL 180CM TYPE RAD)
OBS CODE 1 TANAKA KEN'ICHI

DATE	TIME(UTC)	AGE	CT	STAR NO.	MAG	PH	TEL	OBS	REC	O-C(")	HW(")	K-R(DEG)	KM(DEG)	REPORT	DAT.NO.
4 8 10	17 41 15.2	24.3	X	6698	8.5	RD	1	1	1	0.29	-0.85	146.7	228.4	115400	0001
4 8 10	18 18 4.6	24.3	X	6735	8.2	RD	1	1	1	0.74	-0.59	127.0	208.9	115400	0002
4 9 8	18 25 45.4	23.7	X	6763	6.8	RD	1	1	1	-0.29	0.70	222.2	314.5	115400	0003
4 11 30	17 18 37.9	18.1	X	11372	4.1	RD	1	1	1	-0.52	0.79	254.7	353.1	115400	0004
4 12 2	14 53 58.9	20.0	X	1199	6.1	RD	1	1	1	-0.62	0.82	203.1	311.5	115400	0005
4 12 17	12 3 47.5	5.4	X	31074	5.9	DD	1	1	1	-0.35	-0.44	2.6	66.8	117400	0002
4 12 21	12 1 26.1	9.4	X	2827	7.5	DD	1	1	1	-0.23	0.27	292.0	357.0	117400	0003
4 12 22	10 51 20.3	10.4	X	3761	5.3	DD	1	1	1	-0.20	-1.37	320.2	28.1	117400	0004

図:ILOCから送られてきた整約の一覧である。2回の整約レポートを1つにまとめている。

6-2.小惑星による恒星の掩蔽の整約結果

この日の小惑星による掩蔽は大変好条件だったにも関わらず、天候不良などにより田中謙一（大阪教育大学/大阪府)、石田正行氏（滋賀県彦根市)、浅井晃氏（三重県いなべ市)、福井英人氏（静岡県藤枝市）の全部で4地点の観測にとどまり、掩蔽による減光を確認できたのは福井氏の1地点だけで精密な小惑星の形を決めるには至らなかった。

図：小惑星Latonaによる恒星の掩蔽観測から得られたLatonaの円構造

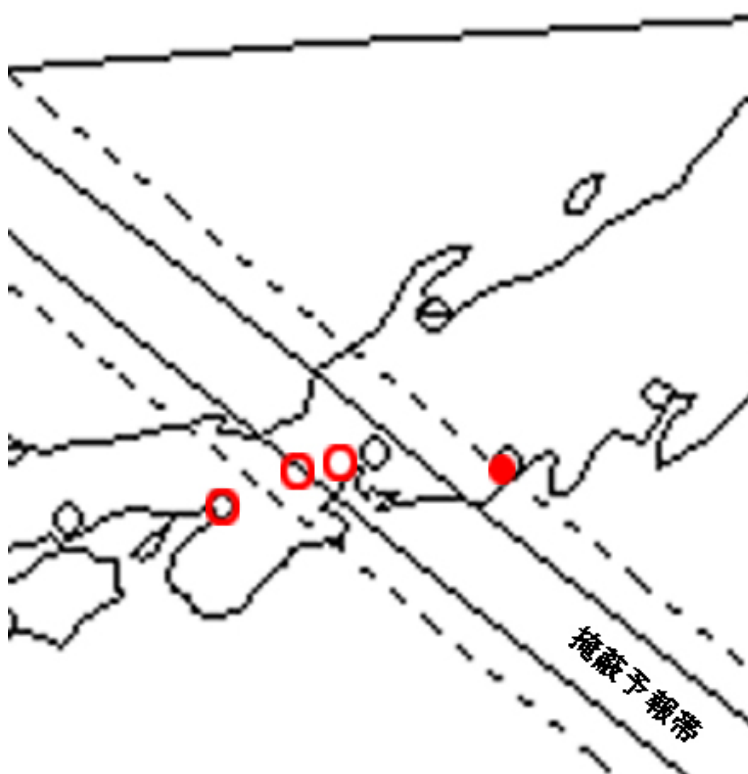
（せんだい宇宙館のHPより　整約はせんだい宇宙館早水氏による）[10]

7.考察

7-1.月による恒星の掩蔽の考察

ILOC から送られた整約より、星食の位置の観測値と計算値の差が求められた。これにより月の運動が計算値よりもどれだけずれているかを知ることができる。また、ワッツの月縁図による星食の位置での月の形を知ることもできる。ただし、ワッツの月縁図は前述のように様々な誤差があるので、精密さは保証できない。前述のように星食から別な整約方法により精密な月縁データを求めることもできるが、今回は求めていない。等級が明るい恒星の星食であると、観測のキャンペーンが行われ、それを解析集計して整約することにより連続した月の月縁データが得られる等有意義なデータが得られるので、明るい等級の星食は機会があれば行ってみたいと考えている。

7-2.小惑星による恒星の掩蔽の考察

今回の観測では、天候不良により 4 地点での観測に終わった。発表されていた予報掩蔽帯と実際に観測された地点を以下の地図に示す。

図：発表されていた
予報掩蔽帯と観測成功地点
赤丸は恒星の減光が確認された地点を示し、白丸は減光が確認されなかった地点を示す

この図と整約結果の図により、元々掩蔽予報帯に入っていた石田氏（滋賀）や掩蔽帯の中心に位置していた浅井氏（三重）では掩蔽による恒星の減光は見られず、エラーバーのほぼ外側に位置する福井氏（静岡）の地点で減光が見られた。このことより小惑星 Latona は予報よりも北の経路にシフトしたと考えられる。[10]

8.まとめ

観測した動画を解析することにより、精密な星食の時間が得ることができた。1 フレームをさらに 2 つのフィールドに分けることで動画上では 60 分の 1 単位の時間決定を可能にしているが、今回 TIVi の時刻同期の方法が固定電話による時報を用いたため、この部分で 0.03 秒程度の固定電話の誤差が発生してしまう。このため結局は 30 分の 1 程度の時刻精度しか得られない。この問題を解決する方法として、GPS システムを用いた GHS 時計を用いる方法がある。この装置を用いれば、500 ナノ秒（500×10^{-9} 秒）という極めて精度の高い時刻保持が可能になる。これまで商用の GPS 時計は発売されていたが、高価で個人で利用するには敷居が高かった。2001 年に早水勉氏らが「GPS による汎用時刻保持装置の開発」（国立天文台報第 5 巻(24)）で安価に GHS 時計を作成できるキットを開発されてからは、個人単位で GHS 時計を用いることができるようになり、時刻精度が格段に向上した。また、パソコンに時刻同期用の GPS 受信機を接続して音声信号を発生させ、それをビデオカメラに録音させるという方法も時刻の決定方法の一つとしてある。

近年小惑星による恒星の掩蔽観測の成功報告が増えているのは、予報精度の向上が最大の理由であるが、その他にもデジタルカメラ、デジタルビデオカメラ、パソコン等観測するのに適したデジタル機器が広く普及したこともその理由の一つとして挙げられる。この観測は正確な時刻を保持できれば誰にでも行える観測であるので、この観測を通してアマチュアとプロの交流が進めば天文学の普及教育の一環になると考えている。

その普及教育の一環として、WWW 上での掩蔽観測の情報の提供が挙げられる。インターネットは現在容易に情報を入手する手段の一つになっており、世界中の最新の情勢や情報を瞬時に手に入れることができる。このことから、掩蔽観測の観測方法や撮影した動画を掲載すれば広く一般の方々に「掩蔽」という天文現象を知ってもらえるはずである。特に掩蔽の場面を動画で見せることについては、恒星が急に暗くなったり明るくなったりすることが視覚的に認識できるため、天文教育としては非常に効果的であるので、できるだけ早く公開したい。

参考文献,URL

(1)月刊星ナビ 2004 年 10 月号　アストロアーツ編集・発行（2004）
(2)Ainslie, M. A., *MNRAS, vol.77, p.456*（1917）
(3)天文学の歴史　http://homepage1.nifty.com/koarashi/tenmon/tenmon-2.htm
(4)Ridgway, S. T., et al., *AJ, vol.87, p.680*（1982）
(5)掩蔽観測への誘い　http://circle.cc.hokudai.ac.jp/hokuten/olddata/occultationx.html
(6)相馬充,国立天文台年次報告　第 13 冊　p.45（2000）
(7)相馬充,早水勉,国立天文台報　第 5 巻　p.29（2001）
(8)David, W.D., et al., *Mem. S.A.It.,　vol.73 , p.662*（2002）
(9)OBSERVED MINOR PLANET OCCULTATION EVENT(IOTA)
　http://www.lunar-occultations.com/iota/asteroids/obserlst.htm
(10)せんだい宇宙館　http://uchukan.satsumasendai.jp/
(11)大阪教育大学天王寺キャンパス天文台 2001～2002　研究報告書（2003）
(12)地図センター電子国土サイト　http://denshikokudo.jmc.or.jp/
(13)地図閲覧サービス　http://watchizu.gsi.go.jp/
(14)宇宙を観るＩ＜初級編＞　横尾武夫編　恒星社（1989）
(15)誠文堂新光社天文ガイド編集部/早水勉,「TIVi Ver.2.0 取扱説明書」（2002）
(16)星食国際中央局(ILOC)　http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOHO/iloc/docs/iloc.html
(17)Asteroid Occultation Predictions　http://www.asteroidoccultation.com/
(18)瀬戸口貴司のページ　http://www7.ocn.ne.jp/~set/
(19)Minor Planets at 366　http://www.toybox.gr.jp/mp366/
(20)SIMBAD Astronomical Database　http://simbad.u-strasbg.fr/Simbad
(21)8 ミリビデオ大百科　森尾稔編　オーム社（1993）
(22)パソコンによる動画像処理　三池秀敏／古賀和利編著　森北出版（1993）
(23)RASNZ Occultation Section　http://occsec.wellington.net.nz/
(24)早水勉, 相馬充,下代博之,橋口隆,国立天文台報　第 5 巻　p.73（2001）

謝辞

この観測を始めるにあたり、たくさんの方々のお世話になりました。最初に「掩蔽」という単語さえも知らなかった（かつ読めなかった）私に分かりやすくご教示してくださった大西高司先輩、星食の予報と整約を行ってくださった ILOC の川田光男氏、小惑星による掩蔽の予報の掲載と整約を行ってくださったせんだい宇宙館の早水勉氏、観測装置のことや卒論の書き方について色々とご指導いただいた定金晃三先生にこの場を借りてお礼申し上げます。

最後にいつも楽しく明るい雰囲気を提供してくれた宇宙科学研究室の皆様と天文学研究室の皆様、本当にありがとうございました。